

# 水圧破砕き裂の力学挙動を利用した高精度地殻応力計測評価法に関する研究

著者	佐藤 晃
号	2058
発行年	1997
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7331">http://hdl.handle.net/10097/7331</a>

ふ	り	が	な	さとう	あきら
氏			名	佐藤	晃
授	与	学	位	博士	(工学)
位	授	与	年	月	日
学位授与の根拠法規				平成10年3月25日	
研究科、専攻の名称				学位規則第4条第1項	
学位論文題目				東北大学工学研究科(博士課程)機械電子工学	
				水圧破碎き裂の力学挙動を利用した高精度地殻応力計測評価法	
				に関する研究	
指	導	教	官	東北大学教授	林 一夫
論文審査委員				主査 東北大学教授	林 一夫
				東北大学教授	中塚勝人
				東北大学教授	松木浩二
				東北大学助教授	橋田俊之

## 論文内容要旨

地下数千メートルに及ぶ大深度に適用可能な地殻応力評価法としては、水圧破碎による方法が現在のところ最も有力であると考えられている。この水圧破碎による方法は基本的には水圧破碎時に得られる3つの水圧データ(破碎圧(Breakdown pressure), き裂開口圧(Shut-in pressure)およびき裂開口圧(Reopening pressure)), ならびに水圧破碎によって初生したき裂面の方位とから地殻応力を評価するものである。この水圧破碎地殻応力計測評価法は、ボーリング可能な深度まで計測可能であることに加え、応力評価に岩体の縦弾性係数あるいはポアソン比等の物性値が不要で、ひずみ等の量を介さずに直接応力の大きさを評価できること、既存のボアホールでの計測が可能でボアホールを新たに掘削する必要がないこと、1本のボアホールで深さ方向に多数の地点で測定できることなど多くの利点を有する。

しかしながら、これまで実施された多数の水圧破碎のフィールド実験および水圧破碎の室内実験を通して、この従来型の水圧破碎法の適用性について様々な問題があることが次第に明らかになってきた。水圧破碎法は、元来、均質な岩体中で行われることを想定し、地殻主応力軸の一つがボアホール軸と一致していると仮定でき、さらに水圧破碎によってボアホール軸に平行な縦き裂が初生する場合を前提として開発されてきた方法である。しかし、このような理想的な条件とは異なり、一般に岩体中には天然き裂あるいは小断層といった既破断面や弱面が多数存在するため、これらを含む区間で水圧破碎を行うと、想定した縦き裂ではなく既破断面および弱面が開口することが多々ある。このようにして開口したき裂は通常ボアホール軸を斜めに横切るような斜めき裂である。したがって、上述のボアホール軸に平行な縦き裂が開口するという仮定を用いて地殻応力を評価することができない。一方、主応力軸の1つがボアホール軸と一致していないような場合においても、均質な岩体中においては縦き裂が初生することが分かっている。また、弱面群を有する岩体中においても、弱面を含まない比較的均質な区間を加圧区間に設定することにより縦き裂を作成することができる。しかし、このような場合においてもき裂進展の過程で弱面等と連結してしまい、従来考えられているような理想的な縦き裂にはならないケースも見られる。

さらに、応力を評価する際の基本データである各水圧データに関して、従来の理論に反する実験事実がいくつか明らかになってきた。まず、破碎圧については、破碎圧がボアホール径および

加圧時のボアホール水圧の上昇速度に依存して変化するという事実が実験的に明らかにされているが、これらの現象を従来の理論で説明することは困難である。さらに、現位置における岩体の抗張力を正確に評価することができないため、信頼性の高い評価結果を得ることが困難である。また、元々、破碎圧に関するこのような問題点を回避するための新たな水圧データとして提案されたき裂開口圧についても、次のような問題点が明らかになっている。すなわち、き裂開口圧、つまり一定圧入流量で再加圧した際にボアホール水圧と時間の関係が線形から非線形に変化し始める時のボアホール水圧は、従来型の水圧破碎法での仮定に反して、き裂が実際に開き始めるときの水圧とは一般には一致せず、しかも、その大きさがき裂開口圧の大きさに本質的に等しいことが明らかになっている。この結果は、見かけのき裂開口圧を利用する従来法では地殻応力の大きさを評価できないことを意味する。

以上の背景のもとに本論文では、従来型の水圧破碎法で想定しているような理想的な条件とは異なり、フィールドにおける複雑な条件下において適用可能であり、しかも、より高精度で信頼性の高い地殻応力評価結果を得るために、

1. 斜めき裂のき裂開口圧ならびに縦き裂の初生方位を用いた地殻応力評価法
2. ボアホール変形挙動直接計測による地殻応力評価法

の新たな2つの地殻応力評価法を提案する。

本論文は全6章より成る。第1章は緒論であり、水圧破碎地殻応力計測評価法の現状と問題点を述べ、これに基づき、本研究の背景と目的を明らかにした。

第2章では、複数の斜めき裂のき裂開口圧と縦き裂の初生方位とを組み合わせ、より高精度の地殻応力評価法を提示した。また、この方法で求まる応力状態の信頼性を定量的に評価する方法を考案するとともに、数値実験によって、応力評価に用いる斜めき裂面の方位類似性と応力評価結果の信頼性について検討した。本章で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 斜めき裂のき裂開口圧ならびに縦き裂の初生方位を用いて応力状態を評価する場合の非線形連立方程式について具体的解法を示した。さらに、き裂面の方位ならびにき裂開口圧が有する誤差から、評価した主応力の大きさならびに主応力の作用方向の誤差の最大の範囲を定量的に評価する方法を提示した。
- (2) 斜めき裂のき裂開口圧を用いて応力状態を評価する場合、応力評価に用いるき裂の組み合わせによって評価結果の信頼性が大きく異なる。そこで、地殻応力評価に用いるき裂の組み合わせの良否を定量的に表す指標として、き裂面方位に関する条件数を導入した。この条件数を比較検討することによって、水圧破碎実施以前にあらかじめ応力評価結果の信頼性を予測できることがわかった。

第3章においては、き裂を含むボアホール区間にパッカーエレメントを介して流体圧を負荷した時のボアホール壁面の変形挙動を有限要素解析によって明らかにし、ボアホール変形挙動直接計測による新たな地殻応力評価法について検討した。さらに、任意の3次元応力状態下で、上述の方法で評価したボアホール軸に直交する面内での応力状態と、3次元応力場から求められるボアホールに直交する面内の応力状態をそれぞれ比較し、本章で示した地殻応力評価法の適用性について検討した。本章で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) ボアホール壁面のみを加圧した時のき裂開口後のボアホール壁面の変形挙動を有限要素解析によって明らかにし、ボアホール壁面でのボアホール内圧力と周方向ひずみ増加量（ボアホール内圧力が零の状態からの増加量）の関係の計測結果からき裂開口圧を評価する新

たな方法を提案した。さらに、き裂位置におけるき裂開口前後の周方向ひずみ増加量のボアホール内圧力に対する変化率から、岩体の弾性定数を評価する方法を示した。

- (2) 任意の 3 次元応力状態の下で、ボアホールに直交する面内での地殻応力状態を評価した場合の評価結果の誤差について検討した。その結果、岩体の抗張力が平均応力と同等あるいはそれ以上であるならば、縦き裂の初生方位、き裂開口圧およびき裂閉口圧からボアホールに直交する面内での応力状態をほぼ正確に評価できることが分かった。

第 3 章で示したボアホール壁面直接計測によるき裂開口圧評価法を具体化するためには、パッカーエレメントを用いてボアホールを加圧した時のボアホール壁面の変形挙動を計測可能なセンサーおよび計測装置が必要である。第 4 章では、パッカーエレメントを用いてボアホール壁面に圧力を負荷した際に、ボアホール壁面の変形挙動が計測可能なセンサー（変形測定子）および計測装置の開発を行った。さらに、室内実験によって実際にボアホール壁面の変形挙動計測試験を行い、その結果からき裂開口圧を評価し、第 3 章で提示した新たな地殻応力評価法の有効性について検討を行った。本章で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) ボアホールおよび縦き裂を模擬した一辺が 300mm の試験片を用いて計測試験を行った。その結果、実測した縦き裂を含むボアホール区間の変形挙動は、有限要素解析によって求めた変形挙動とほぼ一致しており、精度良く計測が行われていることを示すとともに、本研究で開発した変形測定子を含めた計測装置の実用性を実証した。
- (2) 上記 (1) で得られた計測結果から、き裂開口圧ならびに試験片として用いた岩体の弾性定数を評価した。本研究では、3 種類の異なる応力場について計測を行った結果、いずれの応力場に対してもき裂開口圧を非常に精度良く評価できることが分かった。さらに、岩体の弾性定数についても妥当な結果が得られた。

第 5 章では、まず、より高精度の地殻応力評価法として第 2 章で提案した斜めき裂の閉口圧ならびに縦き裂の初生方位を用いた地殻応力評価法を、東北大学釜石フィールドにおけるフィールド実験に適用し同フィールドの応力場を明らかにした。また、本方法で評価した地殻応力場の信頼性を評価する方法を用いて評価結果の信頼性について検討を行った。次に、第 3 章で提案したボアホール壁面の変形挙動直接計測試験を同フィールドで実施し、その結果からき裂開口圧を評価するとともに、このき裂開口圧を用いて評価した応力場について検討を行った。本章で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 斜めき裂の閉口圧ならびに縦き裂の初生方位を用いて、東北大学フィールドにおける 3 次元応力場を評価した。その結果、最小圧縮主応力は鉛直方向よりやや南西方向に、中間圧縮主応力はほぼ南北方向に作用していることが分かった。さらに、最大圧縮主応力は水平面から東に  $28^\circ$  傾斜した平面上ではほぼ東西方向に作用していることが分かった。
- (2) 上記 (1) で得られた評価結果に対して第 2 章で示した評価結果の信頼性を評価する方法を適用し、実際に同フィールドで評価した応力場の誤差範囲について検討した。その結果、主応力の大きさに対する誤差の最大値ならびに主応力の作用方向に対する誤差の最大の範囲は、いずれの主応力についても小さい範囲をとっており、精度の高い評価結果であることを示した。
- (3) 実フィールドにおいて適用可能なボアホール壁面の変形挙動計測用の変形測定子ならびに計測装置を開発し、実際に東北大学釜石フィールド KF-2 井において変形挙動直接計測試験を実施した。その結果、縦き裂近傍でのボアホール壁面の変形挙動ならびに周方向位置

による変形挙動の違いを精度よく計測可能であること，さらに，この計測結果からき裂開口圧を精度よく評価できることが分かった。

- (4) 上記(1)で示した地殻応力評価結果，上記(3)で評価したき裂開口圧を用いた地殻応力評価結果，さらに，円錐孔底ひずみ法による同実験フィールドの地殻応力評価結果をそれぞれ比較検討した。その結果，いずれの評価結果も互いに整合性があり，本研究で示した地殻応力評価法により実フィールドの地殻応力状態を精度よく評価できることが分かった。

第6章は結論であり，本研究において得られた結果をまとめて述べた。

## 審 査 結 果 の 要 旨

大深度での地殻応力計測評価法としては、水圧破碎による方法が最も有力であるといわれている。しかし、特に地熱地帯では、岩体中に多数の既破断面や弱面が存在し、縦き裂を用いた従来型の水圧破碎法を適用することが困難である場合が多い。また、縦き裂が得られた場合でも、水圧破碎法によって得られる水圧データのうち、特にき裂開口圧に関しては、き裂の変形挙動以外の多数の因子が複雑に影響する。その結果、従来の理論では応力状態を評価できないということになる。本論文は、これらの欠点を克服し、信頼性の高い新しい二つの地殻応力評価法を提案し、さらに、それらを実フィールドに適用してその有効性を検証したもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、複数の斜めき裂のき裂開口圧と縦き裂初生方位とを組み合わせた地殻応力評価法ならびにその信頼性評価法を提示している。これらは世界に先駆けた画期的方法である。

第3章では、パッカーエレメントを用いて縦き裂を含む坑井区間を加圧した場合を想定し、その場合の坑井の変形挙動を解析し、これに基づき、坑井の変形の直接計測結果からき裂開口圧を評価する方法を提示している。さらに、岩体の弾性定数を現位置計測評価する方法を併せて提示している。これまでにない新しい試みである。

第4章では、坑井の変形挙動を計測可能なセンサーならびに計測装置の詳細を述べ、さらに、室内実験を実施して、前章で提案した方法の有効性及び実用性について検証を行っている。

第5章では、本論文で提示した二つの方法を、東北大学釜石フィールドにおけるフィールド実験に適用し、実フィールドにおける有効性について検証するとともに、同フィールドの応力状態を明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、斜めき裂のき裂開口圧と縦き裂の初生方位とを使った新しい地殻応力計測評価法、ならびに、坑井をジャケット加圧した時の坑井変形挙動に基づく新しい地殻応力計測評価法を開発したもので、機械工学ならびに地球工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。